

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЛАВНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В настоящее время на различных промышленных предприятиях, энергетике, нефте- и газодобывающей отраслях для запуска электродвигателей переменного тока широко применяются прямой и реакторный способы пуска. Основным их достоинством является простота и относительная дешевизна. Однако, в плане электромагнитной совместимости с системой электроснабжения (ЭС), особенно при пуске высоковольтных электродвигателей большой мощности, данные способы пуска не удовлетворяют современным требованиям. В момент пуска существенно ухудшаются показатели качества электроэнергии, что отрицательно сказывается на работе, как собственно системы электроснабжения, так и электроприёмников. Мощности двигателей соизмеримы с мощностью питающих подстанций, и они значительно снижают качество напряжения в системе электроснабжения из-за большого пускового тока, который в несколько раз превышает номинальный. При пуске двигателей происходит глубокая посадка напряжения на шинах распределительной подстанции, которая может привести к сбоям в работе других потребителей и срабатыванию секционной защиты [1-4].

Для уменьшения негативного влияния на сеть в качестве устройства плавного пуска асинхронных и синхронных двигателей с номинальным напряжением 3, 6 и 10 кВ всё более широко применяются тиристорные высоковольтные преобразователи напряжения (ТПН). Высокие технико-экономические показатели получают при плавном пуске мощных электроприводов механизмов центробежного принципа действия: насосов, вентиляторов, компрессоров [3,4]. Однако тиристорный преобразователь является нелинейным элементом в цепи питания активно-индуктивной нагрузки. Нелинейность обусловлена ключевым характером работы силового полупроводникового прибора. Таким образом, в системе ЭС ТПН является источником высших гармонических составляющих напряжения и тока.

Типовая схема электроснабжения асинхронных электроприводов центробежных механизмов с системой группового плавного пуска на базе преобразователя типа ПАД-В-Г разработки и серийного производства ЗАО «АСК» приведена в [3]. В качестве примера для оценки возможности применения ТПН для плавного пуска типового асинхронного двигателя (АД) мощностью 2,1 МВт в реальной системе электроснабжения приводятся расчёты провала напряжения на секционных шинах. Такие двигатели часто используются для привода центробежных насосов, дымососов и турбокомпрессоров. Именно провалы напряжения порождают большинство проблем в сетях и являются ключевым показателем качества электроэнергии. Все расчёты производятся с применением упрощённых инженерных методов и формул [5] с погрешностью не более 10 %. На практике этого вполне достаточно, и что очень важно, простота значительно повышает воспринимаемость расчётов и доверие к полученным значениям широким кругом специалистов. Эквивалентная расчётная схема приведена на рис. 1.

Рассчитаем минимальный ток статора АД, необходимый для преодоления момента трогания механизма и плавного разгона. Для расчёта в таблице 1 приведены необходимые паспортные данные на электродвигатель и механизм.

Как известно электромагнитный момент двигателя пропорционален напряжению статора

$$M_{\text{эм}} \sim U_1^2 \quad \text{или} \quad \sqrt{M_{\text{эм}}} \sim U_1. \quad (1)$$

Таблица 1 – Паспортные данные электродвигателя и механизма

Номинальные параметры двигателя и механизма				Относительные параметры		
Напряжение статора	Ток статора	Электромагнитный момент	Статический момент механизма	Пусковой ток двигателя	Пусковой момент двигателя	Момент трогания механизма
$U_{1\text{ном}}, \text{В}$	$I_{1\text{ном}}, \text{А}$	$M_{1\text{ном}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_{2\text{ном}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$I_{1\text{пуск}}/I_{1\text{ном}}$	$M_{1\text{пуск}}/M_{1\text{ном}}$	$M_{2\text{тр}}/M_{2\text{ном}}$
10000	139	20145	17931	6,7	0,8	0,15

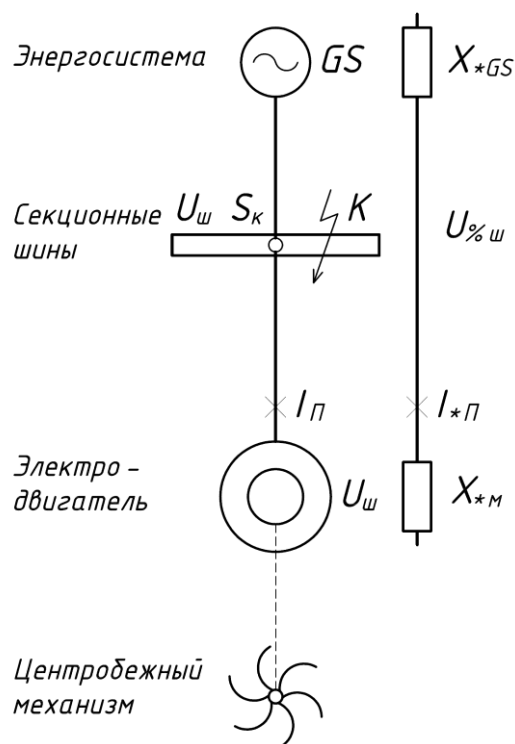
Коэффициент снижения напряжения статора двигателя можно вычислить, используя соотношение

$$\sqrt{\frac{0,15 \cdot M_{2\text{ном}}}{0,8 \cdot M_{1\text{ном}}}} = \frac{U_{1\text{пмин}}}{U_{1\text{ном}}}; \quad (2)$$

где $U_{1\text{пмин}}$ – минимальное напряжение на статоре, обеспечивающее запуск двигателя.

После расчёта получим, что для обеспечения трогания механизма и плавного разгона можно снизить питающее напряжение до 41 % от номинала. Соответственно, пропорционально уменьшится и кратность пускового тока до 2,75. Однако для гарантированного запуска механизма при посадках сетевого напряжения необходимо пусковой ток увеличить на 5%. При этом минимальный ток, гарантирующий пуск данного механизма составит 29 %. Расчёт остающегося напряжения будем производить без учёта кабельных линий идущих к двигателю, влияния соседней нагрузки и конденсаторных батарей на секционных шинах [5]. Путём организационных мероприятий можно добиться наилучшего режима пуска двигателя. Исходные данные энергосистемы для этого режима следующие: ток короткого замыкания на шинах 10 кВ $I_{\text{шкз}} = 6,52 \text{ кА}$ при напряжении $U_{\text{шном}} = 10 \text{ кВ}$; кратность пускового тока $K_{\text{п}} = 2,9$. Используя простые и известные формулы [5,6] производим расчёты в относительных единицах. Получим остающееся относительное напряжение на секционных шинах 94 %. Провал напряжения на шинах составит 5,8 %.

Представляет интерес рассчитать коэффициенты гармонических составляющих напряжения на шинах подстанции. Однако такие расчёты не могут быть выполнены простыми формулами. Для этого используется математическая модель АД с параметрами Т-образной схемы замещения. На практике получить требуемые параметры АД не всегда возможно. Но если они есть, то расчёты выполняются с использованием компьютерного моделирования [6]. На рис. 2 приведены осциллограммы в относительных единицах мгновенных значений линейного напряжения на шинах подстанции и тока одной из фаз двигателя для наиболее тяжёлого режима. При этом



ток уже достиг своего максимального значения, а вал двигателя только тронулся. Скольжение ещё равно единице. На рис. 3 приведены значения коэффициентов для 1,5,7,11 и 13 гармонических составляющих напряжения на секционных шинах. Как видно, гармоники кратные 3 отсутствуют в связи с их полным подавлением в схеме соединения – звезда. Все рассчитанные показатели качества электроэнергии сведены в таблицу 2. По мере разгона двигателя форма тока улучшается, а искажения напряжения уменьшаются.

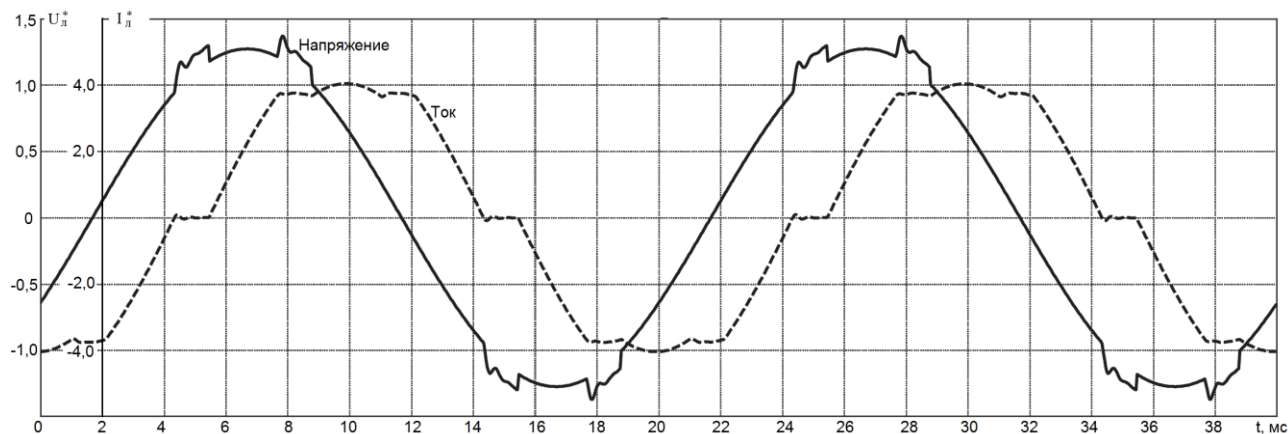


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на секционных шинах и тока статора

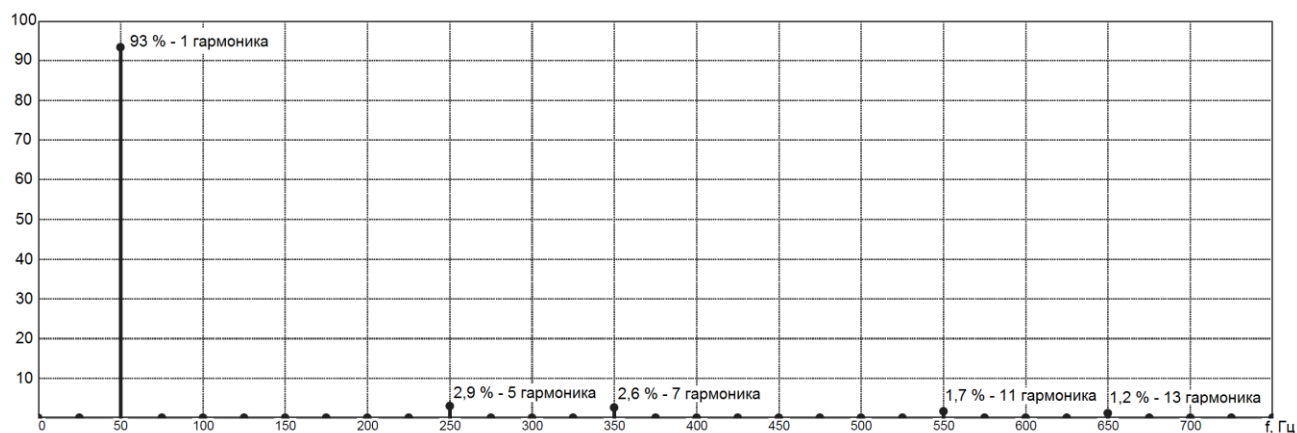


Рис. 3. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения на секции

Таблица 2 – Сравнение показателей качества электроэнергии

Показатель качества	Расчётный	Допустимый по ГОСТ 32144-2013
Глубина провала напряжения	5,8 %	10 %
Искажение синусоидальности напряжения	7 %	8 %
5-я гармоническая составляющая	2,9 %	4 %
7-я гармоническая составляющая	2,6 %	3 %
11-я гармоническая составляющая	1,7 %	2 %
13-я гармоническая составляющая	1,2 %	2 %

Анализ таблицы 2 показывает, что основные показатели качества, на которые наиболее значительное воздействие оказывает система ТПН – АД в режиме пуска,

не выходят за рамки допустимых значений ГОСТ [7]. Можно сделать вывод, что при кратности пускового тока 3-4 номинала и отношении мощности короткого замыкания энергосистемы к полной мощности двигателя не менее 40, тиристорный преобразователь напряжения не оказывает существенного влияния на питающую сеть. Дополнительных мер, улучшающих электромагнитную совместимость при плавном пуске, применять нет необходимости. Однако провал напряжения можно снизить путём параллельного соединения шин секций и увеличением ёмкости конденсаторных батарей компенсатора реактивной мощности, на момент запуска электродвигателя.

В настоящее время на предприятиях России и за рубежом ЗАО «АСК» реализовано несколько десятков проектов системы группового плавного пуска асинхронных и синхронных двигателей центробежных механизмов с использованием высоковольтного преобразователя на напряжение сети 3, 6 и 10 кВ и мощностью двигателя от 0,25 до 4 МВт [1-4]. Основными заказчиками являются: АК «Транснефть» - подпорные насосы нефтепровода ВСТО; ОАО «УГМК-холдинг» - турбокомпрессоры и глубинные насосы на шахтах; ОАО «ВСМПО-Ависма» - плунжерные насосы гидроаккумуляторной станции, Выксунский, Новолипецкий металлургические заводы и ряд других организаций. При обосновании целесообразности и возможности применения системы плавного пуска в существующей или проектируемой системе электроснабжения многие заказчики требуют выполнения подобных расчётов, которые показывают удовлетворительную сходимость теоретических и практических результатов. Системы с ТПН в полной мере соответствует предъявляемым требованиям и положительно зарекомендовали себя в эксплуатации. Во всех реализованных проектах провалы напряжения и гармонические составляющие на секционных шинах подстанции при плавном пуске находятся в допустимых ГОСТом пределах.

Список использованных источников

1. Ткачук А.А., Копырин В.С. Групповой плавный пуск высоковольтных синхронных электроприводов компрессорных станций // Электротехнический рынок. 2007. № 12. С. 22-24.
2. Тиристорный преобразователь для плавного пуска высоковольтных асинхронных двигателей / А.А. Ткачук, В.К. Кривовяз, В.С. Копырин, А.Ю. Силуков // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 54-57.
3. Плавный пуск группы высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов / А.А. Ткачук, В.К. Кривовяз, В.С. Копырин, А.Ю. Силуков. Силовая электроника. 2008. № 2. С. 16-19.
4. Высоковольтные тиристорные преобразователи в системах плавного пуска электроприводов / А.А. Ткачук, А.Ю. Силуков, А.А. Шелгачев, В.В. Епифанов. Сб. науч. тр. 7-й международной (19-й всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 467-472.
5. Ткачук А.А. Улучшение электромагнитной совместимости мощных высоковольтных электроприводов переменного тока в пусковых режимах // Сб. докл. 2-й международной НПК в рамках выставки «Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение в промышленности и ЖКХ» (15-17 мая 2012 г.). Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки», 2012. С.135-138.
6. Ткачук А.А. Электромагнитная совместимость тиристорных преобразователей напряжения в системах плавного пуска высоковольтных электроприводов // Сб. науч. тр. 16-й международной НТК «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. С. 63-66.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.